

НАЗЕМНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ВНЕ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ 1064 НМ

Познахареv Е.С.¹, Крючков А.В.¹, Белов В.В.¹, Федосов А.В.¹, Абрамочкин В.Н.¹

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

e-mail: 724_pes1992@iao.ru, kaw@iao.ru, belov@iao.ru, Fean.2010@yandex.ru, ya.wna@yandex.ru

Аннотация. Основным преимуществом оптической связи в прямой видимости является возможность передачи данных с высокой скоростью, однако в таком случае осуществить связь возможно только между небольшим количеством абонентов в локализованной части пространства. Оптическая связь вне прямой видимости позволяет осуществлять передачу данных между неограниченным числом абонентов и при различных конфигурациях схем связи. Нами была создана и запатентована система оптической связи вне прямой видимости на длине волны 1064 нм. Показано, что в вечернее время суток возможна передача данных через шлейф дыма от ГРЭС на базовом расстоянии 3,45 км при фиксированных геометрических параметрах приемо-передающей системы с вероятностью регистрации ошибочно принятых символов не более 0,02.

Введение: Атмосферная оптическая связь вне прямой видимости в настоящее время является одним из активно развивающихся направлений исследования, согласно работам, опубликованным за последнее десятилетие. Заинтересованность к такому типу связи обусловлена возможностью скрытой передачи данных между ограниченным количеством абонентов, возможностью изменения геометрических характеристик системы связи при наличии на линии передачи данных посторонних объектов, а также возможностью многоадресной связи между одним передающим абонентом и множеством принимающих абонентов. Кроме того, по сравнению с системами оптической связи в прямой видимости, для которых наличие тумана или осадков на линии связи могут приводить к потере полезного сигнала, системы оптической связи вне прямой видимости при таких условиях могут нормально функционировать. Согласно публикациям [1-9] теоретические и экспериментальные исследования канала оптической связи вне прямой видимости в основном осуществляются в ультрафиолетовом диапазоне длин волн, в то время как инфракрасный диапазон остается малоизученным. В работах [1-4] оцениваются преимущества оптической связи вне прямой видимости в ИК диапазоне по сравнению с другими диапазонами. Отмечается, что ИК связь на рассеянном излучении возможна на больших базовых расстояниях и с высокой скоростью передачи данных, чем УФ [1,2]. В экспериментальных работах [5-7] оцениваются возможности реализации беспроводной оптической связи на малых базовых расстояниях по схемам с прямой видимостью и при её отсутствии на отраженном излучении. В работах [8,9] рассматривается

возможность использования ИК диапазона длин волн для связи с беспилотными летательными аппаратами.

Ранее нами в рамках экспериментальных исследований было показано, что возможна стабильная оптическая связь вне прямой видимости на длине волны 850 нм и базовых расстояниях до 1,3 км. Также на основе полученных экспериментальных результатов был сформулирован вывод о том, что на расстояниях менее 100 м возможна передача данных при больших значениях азимутального угла приемника, чем на расстояниях более 1 км. В данной работе на основе разработанной системы оптической связи вне прямой видимости на длине волны 1064 нм и запатентованной как изобретение [10] экспериментально оцениваются вероятности регистрации ошибочно принятых символов и их среднеквадратичные отклонения (СКО) по каналу связи между наземными устройствами в полевых условиях на расстоянии до 3,45 км.

Условия проведения и схема полевых экспериментов. Исследования проводились в г. Томске при размещении лазерной передающей системы в южной башне Блока «А» ИОА СО РАН в точке с координатами (56.47548° с.ш., 85.04818° в.д.), а приемника за ГРЭС-2 в точке с координатами (56.47171° с.ш. 84.99212° в.д.). Организация полевого эксперимента, согласно схеме на рисунке 1, осуществлялась следующим образом. На четвертом этаже Южной башни Блока А ИОА СО РАН располагалась лазерная передающая система (S) ориентированная на шлейф дыма от трубы ГРЭСа под углом места θ_s . На базовом расстоянии 3,45 км размещалась приемная система (D), которая фиксировала рассеянное дымом излучение под фиксированным углом места θ_d .

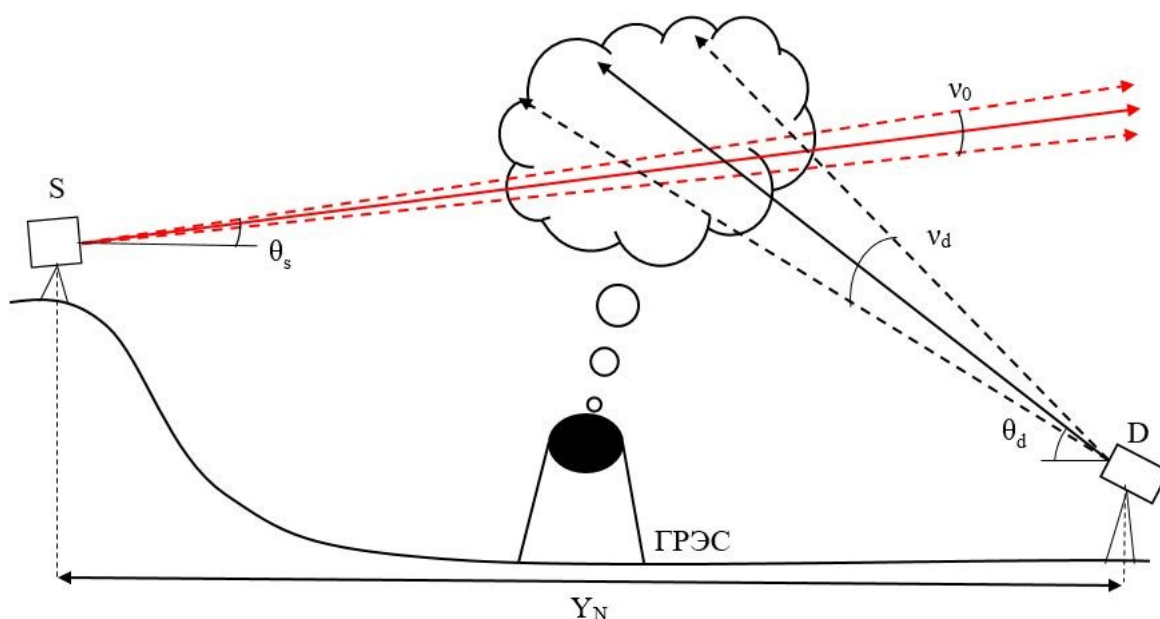


Рисунок 2 – Вид сбоку схемы эксперимента по оптической связи вне прямой видимости в ИК диапазоне. ν_0 – угол расходимости лазерного пучка; ν_d – угол поля зрения приёмника; θ_s – угол места источника; θ_d – угол места приёмника; S – источник; D – приёмник; Y_N – базовое расстояние от источника до приёмника.

Для оценки качества связи в полевых и лабораторных экспериментах использовалась величина характеризующая вероятность регистрации ошибочно принятого символа P_E за сеанс связи и её СКО σ , которые определялись по формулам (1) и (2) соответственно из [11]:

$$P_E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - P_E^2} \quad (2)$$

$$x_i = \begin{cases} 0, i\text{-й символ принят верно} \\ 1, i\text{-й символ принят неверно} \end{cases} \quad (3)$$

где n – общее количество символов в пакете.

Результаты и их обсуждение: Эксперименты 19 сентября 2023 года на базовом расстоянии 3,45 км в вечернее время проводились при следующих условиях: частота следования лазерных импульсов $\nu=30$ кГц; угол расходимости лазерного пучка $\nu_s=2,2$ мрад; длительность лазерного импульса $\Delta t=6$ нс; угол поля зрения приемной системы $\nu_d=24,4$ мрад; спектральный диапазон чувствительности ФЭУ - 950 – 1700 нм; вечернее время; ясный небосвод; базовое расстояние $Y_N = 3,45$ км; относительная влажность – 80%; средняя мощность лазерного излучения $P=3-6$ Вт; угол места источника $\theta_s=1,5^\circ$; угол места приемника $\theta_d=34^\circ$. На рисунке 2 приведены значения вероятностей регистрации ошибочно принятого символа P_E и их СКО.

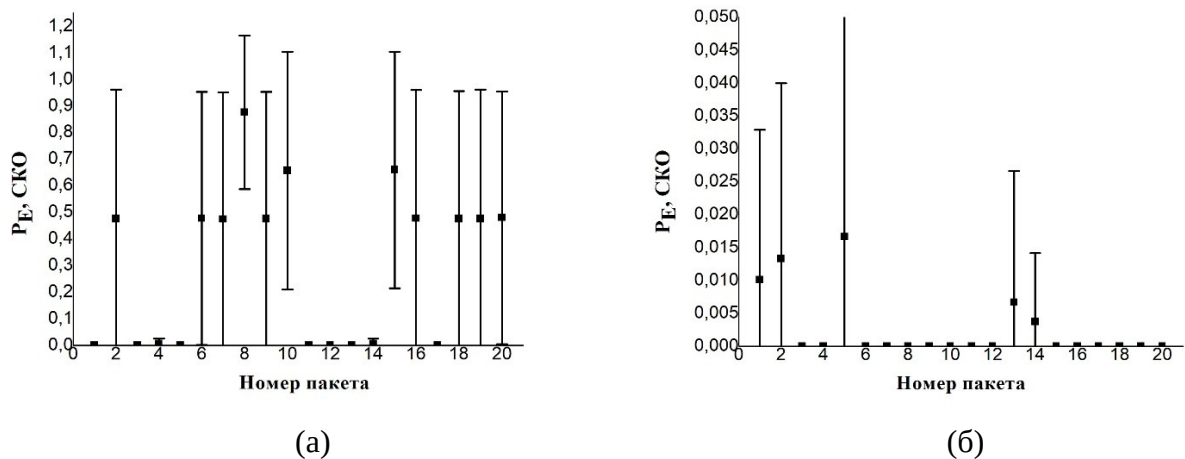


Рисунок 2 – Зависимость вероятностей регистрации ошибочно принятого символа P_E от номера пакета с данными. (а) – при $P=3$ Вт; (б) – при $P=6$ Вт

Результаты экспериментальных исследований показали, что:

1) Быстрое перемещение клубов дыма аэрозолей, выпускаемых ГРЭС, приводит к нестабильности связи, а иногда и к её прерыванию. Это подтверждается резким увеличением значения величины P_E и её SKO на графиках. Причина этого состоит в том, что концентрация аэрозольных частиц в определенной части дымового облака может варьироваться в зависимости от времени, что приводит к нестабильности передачи данных.

2) Наилучший сигнал на базовом расстоянии 3,45 км при $P=6$ Вт зафиксирован, когда поле зрения приемника было ориентировано на область выхода дыма из трубы ГРЭС. Причина этого заключается в том, что на выходе дыма из трубы наибольшая плотность концентрации аэрозольных частиц. В этом случае возможно осуществление устойчивой связи со значением P_E не более 0,02.

Работа выполнена при финансовой поддержке бюджетного проекта FWRU-2021-0002.

1. Shihua Z., Jingyuan W., Zhiyong X., Chao S., Rong W., Yiwang C., Jiyong Z., Yimei W. Attenuation analysis of long - haul NLOS atmospheric optical scattering communication // Optics Laser Technology. 2016. V. 80. P. 51-55.
2. Changming X. and Hongming Z. Channel Analyses Over Wide Optical Spectra for Long-Range Scattering Communication // IEEE COMMUNICATIONS LETTERS. 2015. V. 19. № 2. P. 187-190.
3. Weihao L., Difan Z., Zhengyuan X. Modeling of optical wireless scattering communication channels over broad spectra // JOSA A. 2015. V.32. № 3. P. 486-490.
4. Yu S., Chen G., Zhengyuan X., Yafeng Z. Link Gain and Pulse Width Broadening Evaluation of Non-line-of-sight Optical Wireless Scattering Communication over Broad Spectra // IEEE Photonics Journal. 2017. V. 9. № 3. INSPEC. 16950330.

5. *Hoang T.B., Sahuguede S., Julien-Vergonjanne A.* Behavior of non-directed optical wireless channel considering receiver orientation // 20th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC). 2017. P. 223-228.
6. *Yingjie C., Zixian W., LiZ., Kai Z., Julian C., Yuhua D., Fu H.Y.* QPSK-OFDM Optical Wireless Communication System Based on a Near-infrared VCSEL Using Convolutional Code // 14th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics. 2020. ISBN: 978-0-646-82504-5.
7. *Hoang T.B., Kandukuri S., Sahuguede S., Julien-Vergonjanne A.* Infrared Mobile Transmissions for Smart Indoor Applications // 11th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP). 2018. INSPEC. 18130810.
8. *Mondal A., Hossain A.* Channel characterization and performance analysis of unmanned aerial vehicle-operated communication system with multihop radio frequency-free-space optical link in dynamic environment// International Journal of Communication Systems. 2020. V.33, N.16, P.1-14.
9. *Nzekwu, N.J.; Fernandes, M.A.; Fernandes, G.M.; Monteiro, P.P.; Guiomar, F.P.* A Comprehensive Review of UAV Assisted FSO Relay Systems// Photonics. 2024. 11. 274.
10. Система беспроводной оптической связи вне прямой видимости в инфракрасном диапазоне длин волн: Пат. 2828476. Россия, МПК, H04B 10/00. Познахарев Е.С., Крючков А.В., Федосов А.В., Гришин А.И., Белов В.В. Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. № 2023132334; Заявл. 08.12.2023; Оpubл. 14.10.2024 Бюл. № 29.
11. *Tarasevich M.V., Poznakharev E.S., Fedosov A.V.* Non-line-of-sight atmospheric optical communication in the visible wavelength range between UAV and the ground surface// Atmosphere. 2024. V. 15. N.1. P.21.